

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-175304

(43)Date of publication of application : 29.06.2001

(51)Int.Cl.

G05B 13/02
G06F 17/17

(21)Application number : 11-354246

(71)Applicant : NATL AEROSPACE LAB
MITSUBISHI HEAVY IND LTD

(22)Date of filing : 14.12.1999

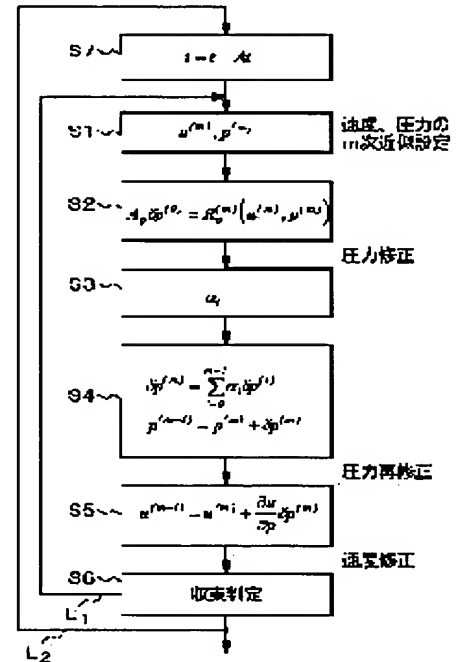
(72)Inventor : KIKUCHI KAZUO
TAKAHASHI KIYOUKO
TAMURA ATSUHIRO
ADACHI TAKESHI

(54) CONTROL DEVICE AND METHOD USING SUCCESSIVE APPROXIMATION ALGORITHM AND RECORDING MEDIUM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a control device and a control method using successive approximation algorithm having high convergence.

SOLUTION: The control method is provided with a step (a) for providing the m-th (m is a positive integer including 0) order approximate solution $x_i(m)$ of a function $F(x_1, x_2, \dots, x_k)=0$ consisting of k (k ≥ 1 , k is an integer) variables, a step (b) for finding out a residual $F(x_1(m))$ of the m-th order approximate solution $x_i(m)$, a step (c) for finding out a correction value $\delta x_i(0)$ for the m-th order approximate solution $x_i(m)$ on the basis the residual $F(x_1(m))$, and a step (d) for finding out an unsettled coefficient α_i for making a residual $F(x_1(m+1))$ of an (m+1)th order approximate solution $x_i(m+1)$ zero. The method is provided also with a step (e) for finding out a re-corrected value $\delta x_i(m)$ on the basis of the correction value $\delta x_i(0)$ and the unsettled coefficient α_i and a step (f) for finding out a converged solution as the (m+1)th order approximate solution $x_i(m+1)$ on the basis of the re-corrected value $\delta x_i(m)$.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

19.08.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the
examiner's decision of rejection or application
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of
rejection][Date of requesting appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2001-175304
(P2001-175304A)

(43)公開日 平成13年6月29日(2001.6.29)

(51)Int.Cl.⁷
G 0 5 B 13/02
G 0 6 F 17/17

識別記号

F I
G 0 5 B 13/02
G 0 6 F 15/353

テームコード^{*}(参考)

K 5 B 0 5 6
5 H 0 0 4

審査請求 未請求 請求項の数42 O L (全 13 頁)

(21)出願番号 特願平11-354246
(22)出願日 平成11年12月14日(1999.12.14)

(71)出願人 391037397
科学技術庁航空宇宙技術研究所長
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
(71)出願人 000006208
三菱重工業株式会社
東京都千代田区丸の内二丁目5番1号
(72)発明者 菊地 一雄
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
科学技術庁航空宇宙技術研究所内
(74)代理人 100102864
弁理士 工藤 実 (外1名)

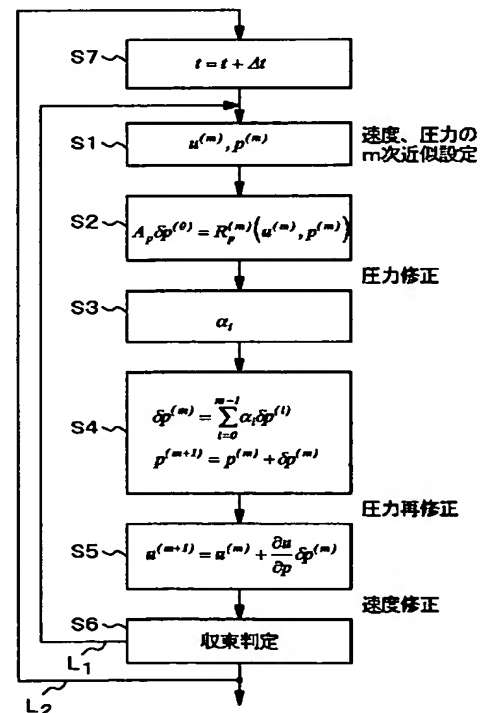
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置、制御方法および記録媒体

(57)【要約】

【課題】 収束性の高い逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置、制御方法および記録媒体を提供する。

【解決手段】 (a) k ($k \geq 1$, k は整数)個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の m (m は0を含む正の整数)次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップと、(b) 前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ についての残差 $(F(x_i^{(m)}))$ を求めるステップと、(c) 前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づいて、前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求めるステップと、(d) $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ をゼロにするための未定係数 (α_i) を求めるステップと、(e) 前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ および前記未定係数 (α_i) に基づいて、再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ を求めるステップと、(f) 前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ として収束解を求めるステップとを備えている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 (a) k ($k \geq 1$, k は整数) 個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ の m (m は0を含む正の整数) 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップと、(b) 前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ についての残差 $(F(x_i^{(m)}))$ を求めるステップと、(c) 前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づいて、前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ を求めるステップと、(d) $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ をゼロにするための未定係数 (α_i) を求めるステップと、(e) 前記修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ および前記未定係数 (α_i) に基づいて、再修正値 $(\delta x_i^{(m+1)})$ を求めるステップと、(f) 前記再修正値 $(\delta x_i^{(m+1)})$ に基づいて、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ として収束解を求めるステップとを備えた逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項2】 請求項1記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ を前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ として、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを繰り返して $(m+2)$ 次の近似解を求めるステップ (L1) を備えた逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項3】 請求項2記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを繰り返して前記 $(m+2)$ 次の近似解を求めるステップ (L1) は、時間 (t) ごとに行う (L2) 逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項4】 請求項1から3のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記近似解を求める対象としての前記変数は、複数有り、前記複数の変数は、互いに独立した独立変数であり、前記複数の変数のそれぞれごとに、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを行う逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項5】 請求項1から3のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記近似解を求める対象としての前記変数は、第1、第2の変数を含み、前記第2の変数は、前記第1の変数に依存する関係とされ、前記第2の変数については前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを行うことなく、前記第1の変数について前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを行う逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項6】 請求項5記載の逐次近似解法アルゴリズム

ムを用いた制御方法において、前記第1の変数は、流体に印加される圧力であり、前記第2の変数は、前記流体の速度である逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項7】 請求項1から6のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記再修正値 $(\delta x_i^{(m+1)})$ は、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ をゼロにする値である逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項8】 請求項1から7のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求めるステップは、前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づく微分方程式または積分方程式を解くことにより求める逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項9】 請求項1から8のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記未定係数 (α_i) は、該未定係数 (α_i) を用いて求められた前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて求められた前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の前記残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ についてのノルム (2乗和) をゼロにする値である逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項10】 請求項1から9のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記未定係数 (α_i) を求めるステップは、変分原理により求める逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項11】 請求項1から10のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記残差は、前記近似解の行列により表される逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項12】 請求項1から11のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記残差は、前記修正値と影響係数との積に等しい逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項13】 請求項1から12のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記再修正値を求めるステップは、前記修正値 $\delta x_i^{(i)}$ の $(i=0 \sim m-1)$ の総和を用いることにより求める逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項14】 請求項1から13のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記関数 $F(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ の前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップは、 $m=0$ のときの前記 m 次の近似解として、初期値を提供する逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法。

【請求項15】 (a) k ($k \geq 1$, k は整数) 個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ の m (m は

0を含む正の整数)次の近似解($x_i^{(m)}$)を提供するステップと、(b) 前記m次の近似解($x_i^{(m)}$)についての残差($F(x_i^{(m)})$)を求めるステップと、(c) 前記残差($F(x_i^{(m)})$)に基づいて、前記m次の近似解($x_i^{(m)}$)に対する修正値($\delta x_i^{(m)}$)を求めるステップと、(d) (m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)の残差($F(x_i^{(m+1)})$)をゼロにするための未定係数(α_i)を求めるステップと、

(e) 前記修正値($\delta x_i^{(m)}$)および前記未定係数(α_i)に基づいて、再修正値($\delta x_i^{(m+1)}$)を求めるステップ、および(f) 前記再修正値($\delta x_i^{(m+1)}$)に基づいて、前記(m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)として収束解を求めるステップの、前記(a)から(f)のそれぞれのステップをコンピュータに実行させるためのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【請求項16】 請求項15記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記(m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)を前記m次の近似解($x_i^{(m)}$)として、前記(a)から(f)のそれぞれのステップを繰り返して(m+2)次の近似解を求めるステップを、コンピュータに実行させる旨の内容が含まれる記録媒体。

【請求項17】 請求項16記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記(a)から(f)のそれぞれのステップを繰り返して前記(m+2)次の近似解を求めるステップ(L1)を、コンピュータに、時間(t)ごと実行させる(L2)旨の内容が含まれる記録媒体。

【請求項18】 請求項15から17のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記近似解を求める対象としての前記変数は、複数有り、前記複数の変数は、互いに独立した独立変数であり、前記複数の変数のそれぞれごとに、前記(a)から(f)のそれぞれのステップをコンピュータに実行させる旨の内容が含まれる記録媒体。

【請求項19】 請求項15から17のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記近似解を求める対象としての前記変数は、第1、第2の変数を含み、前記第2の変数は、前記第1の変数に依存する関係とされ、

コンピュータに、前記第2の変数については前記(a)から(f)のそれぞれのステップを実行させることなく、前記第1の変数について前記(a)から(f)のそれぞれのステップを実行させる旨の内容が含まれる記録

媒体。

【請求項20】 請求項19記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記第1の変数として、流体に印加される圧力が入力され、前記第2の変数として、前記流体の速度が入力される記録媒体。

【請求項21】 請求項15から20のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記再修正値($\delta x_i^{(m+1)}$)は、前記(m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)に対する修正値($\delta x_i^{(0)}$)をゼロにする値であることを示すデータが格納されている記録媒体。

【請求項22】 請求項15から21のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記修正値($\delta x_i^{(0)}$)を求めるステップは、前記残差($F(x_i^{(m)})$)に基づく微分方程式または積分方程式を解くことにより求めることを示すデータが格納されている記録媒体。

【請求項23】 請求項15から22のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記未定係数(α_i)は、該未定係数(α_i)を用いて求められた前記再修正値($\delta x_i^{(m)}$)に基づいて求められた前記(m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)の前記残差($F(x_i^{(m+1)})$)についてのノルム(2乗和)をゼロにする値であることを示すデータが格納されている記録媒体。

【請求項24】 請求項15から23のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記未定係数(α_i)を求めるステップは、変分原理により求めることを示すデータが格納されている記録媒体。

【請求項25】 請求項15から24のいずれかに記載の記録媒体であって、前記記録媒体に記録された前記プログラムにおいて、前記残差は、前記近似解の行列により表される記録媒体。

【請求項26】 請求項15から25のいずれかに記載の記録媒体であって、前記記録媒体に記録された前記プログラムにおいて、前記残差は、前記修正値と影響係数との積に等しい記録媒体。

【請求項27】 請求項15から26のいずれかに記載の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記再修正値を求めるステップは、前記修正値 δx_i

の ($i = 0 \sim m-1$) の総和を用いることによって求めることを示すデータが格納されている記録媒体。

【請求項28】 請求項15から27のいずれかに記載の記録媒体において、
前記記録媒体に記録された前記プログラムには、
前記関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップにおいて、 $m=0$ のときの前記 m 次の近似解として、初期値が提供される記録媒体。

【請求項29】 (a) k ($k \geq 1$, k は整数) 個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の m (m は0を含む正の整数) 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供する手段と、 (b) 前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ についての残差 $(F(x_i^{(m)}))$ を求める手段と、
(c) 前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づいて、前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求める手段と、 (d) $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ をゼロにするための未定係数 (α_i) を求める手段と、
(e) 前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ および前記未定係数 (α_i) に基づいて、再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ を求める手段と、 (f) 前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ として収束解を求める手段とを備えた逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項30】 請求項29記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ を前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ として、前記 (a) から (f) のそれぞれの手段の動作を繰り返して $(m+2)$ 次の近似解を求める手段 (L1) を備えた逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項31】 請求項29または30に記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記 (a) から (f) のそれぞれの手段の動作を繰り返して前記 $(m+2)$ 次の近似解を求める手段 (L1) の動作を時間 (t) ごとに行わせる手段 (L2) を備えた逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項32】 請求項29から31のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記近似解を求める対象としての前記変数は、複数有り、
前記複数の変数は、互いに独立した独立変数であり、
前記複数の変数のそれぞれごとに、前記 (a) から (f) のそれぞれの手段の動作を行わせる手段を備えた逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項33】 請求項29から31のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、

前記近似解を求める対象としての前記変数は、第1、第2の変数を含み、

前記第2の変数は、前記第1の変数に依存する関係とされ、
前記第2の変数については前記 (a) から (f) のそれぞれの手段の動作を行わせること無く、前記第1の変数について前記 (a) から (f) のそれぞれの手段の動作を行わせる逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項34】 請求項33記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記第1の変数として、流体に印加される圧力が入力され、
前記第2の変数として、前記流体の速度が入力される逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項35】 請求項29から34のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ は、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ をゼロにする値である逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項36】 請求項29から35のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求める手段は、前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づく微分方程式または積分方程式を解くことにより求める逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項37】 請求項29から36のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記未定係数 (α_i) は、該未定係数 (α_i) を用いて求められた前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて求められた前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の前記残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ についてのノルム (2乗和) をゼロにする値である逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項38】 請求項29から37のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記未定係数 (α_i) を求める手段は、変分原理により求める逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項39】 請求項29から38のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、
前記残差は、前記近似解の行列により表される逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項40】 請求項29から39のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において

て、
前記残差は、前記修正値と影響係数との積に等しい逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項41】 請求項29から40のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、

前記再修正値を求める手段は、前記修正値 $\delta x_i^{(m)}$ の $(i = 0 \sim m-1)$ の総和を用いることによって求める逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【請求項42】 請求項29から41のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、

前記関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供する手段は、 $m=0$ のときの前記 m 次の近似解として、初期値を提供する逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置、制御方法および記録媒体に関し、例えば、流体の流れをコンピュータでシミュレーションするときの高収束流動解析コードとして実現される逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置、制御方法および記録媒体に関する。

【0002】

【従来の技術】 益々複雑化する科学計算を行うためのアルゴリズムにおいて、逐次近似解法の収束性向上は、逐次近似解法を適用した制御を実用化する上で大きな課題となっている。

【0003】 高収束逐次近似解法とは、様々な最適制御理論に基づいて逐次近似を行いつつ解を数値計算により求める過程で、解の収束性を向上させたものである。

【0004】 制御対象の各種パラメータの解を求めるとき、現状は、近似解を求めるに際し、複数回の修正を繰り返しながらその近似解が漸次正解に近づくという方法により、その収束を期待している。しかしながら、現状の方法では、反復回数が多く、計算時間の点から高精度解析が困難になっている。

【0005】 収束性の高い逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法の提供が望まれている。

【0006】 本発明は、上記の事情に鑑みてなされたもので、収束性の高い逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置、制御方法および記録媒体を提供することを目的としている。

【0007】

【課題を解決するための手段】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法は、(a) k ($k \geq 1$, k は整数) 個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の m (m は0を含む正の整数) 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップと、(b) 前記 m 次の近似

解 $(x_i^{(m)})$ についての残差 $(F(x_i^{(m)}))$ を求めるステップと、(c) 前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づいて、前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求めるステップと、(d) $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ をゼロにするための未定係数 (α_i) を求めるステップと、(e) 前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ および前記未定係数 (α_i) に基づいて、再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ を求めるステップと、(f) 前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ として収束解を求めるステップとを備えている。本発明において前記 (c) のステップを、後述する、だ円形境界値問題の数値解法—残差切除法により行ってもよい。

【0008】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法は、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ を前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ として、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを繰り返して $(m+2)$ 次の近似解を求めるステップ (L1) を備えたものである。

【0009】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法は、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを繰り返して前記 $(m+2)$ 次の近似解を求めるステップ (L1) は、時間 (t) ごとに行う (L2) のものである。

【0010】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法は、前記近似解を求める対象としての前記変数は、複数有り、前記複数の変数は、互いに独立した独立変数であり、前記複数の変数のそれぞれごとに、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを行うものである。

【0011】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記近似解を求める対象としての前記変数は、第1、第2の変数を含み、前記第2の変数は、前記第1の変数に依存する関係とされ、前記第2の変数については前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを行うこと無く、前記第1の変数について前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを行うものである。

【0012】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記第1の変数は、流体に印加される圧力であり、前記第2の変数は、前記流体の速度である。

【0013】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ は、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ をゼロにする値である。

【0014】 本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求

めるステップは、前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づく微分方程式または積分方程式を解くことにより求めるものである。

【0015】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記未定係数 (α_i) は、該未定係数 (α_i) を用いて求められた前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて求められた前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の前記残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ についてのノルム (2乗和) をゼロにする値である。

【0016】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記未定係数 (α_i) を求めるステップは、変分原理により求めるものである。

【0017】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記残差は、前記近似解の行列により表されるものである。

【0018】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記残差は、前記修正値と影響係数との積に等しいものである。

【0019】本発明のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記再修正値を求めるステップは、前記修正値 $\delta x_i^{(i)}$ の $(i=0 \sim m-1)$ の総和を用いることによって求めるものである。

【0020】本発明のいずれかに記載の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法において、前記関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップは、 $m=0$ のときの前記 m 次の近似解として、初期値を提供するものである。

【0021】本発明の記録媒体は、(a) k ($k \geq 1$ 、 k は整数) 個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の m (m は0を含む正の整数) 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップと、(b) 前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ についての残差 $(F(x_i^{(m)}))$ を求めるステップと、(c) 前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づいて、前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求めるステップと、(d) $(m+1)$ 次の近似解

$(x_i^{(m+1)})$ の残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ をゼロにするための未定係数 (α_i) を求めるステップと、(e) 前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ および前記未定係数 (α_i) に基づいて、再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ を求めるステップ、および (f) 前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ として収束解を求めるステップの、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップをコンピュータに実行させるためのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体である。

【0022】本発明の記録媒体において、前記記録媒体

に記録された前記プログラムには、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ を前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ として、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを繰り返して $(m+2)$ 次の近似解を求めるステップを、コンピュータに実行させる旨の内容が含まれるものである。

【0023】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを繰り返して前記 $(m+2)$ 次の近似解を求めるステップ (L1) を、コンピュータに、時間 (t) ごと実行させる (L2) 旨の内容が含まれるものである。

【0024】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記近似解を求める対象としての前記変数は、複数有り、前記複数の変数は、互いに独立した独立変数であり、前記複数の変数のそれぞれごとに、前記 (a) から (f) のそれぞれのステップをコンピュータに実行させる旨の内容が含まれるものである。

【0025】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記近似解を求める対象としての前記変数は、第1、第2の変数を含み、前記第2の変数は、前記第1の変数に依存する関係とされ、コンピュータに、前記第2の変数については前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを実行させることなく、前記第1の変数について前記 (a) から (f) のそれぞれのステップを実行させる旨の内容が含まれるものである。

【0026】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記第1の変数として、流体に印加される圧力が入力され、前記第2の変数として、前記流体の速度が入力されるものである。

【0027】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ は、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ をゼロにする値であることを示すデータが格納されているものである。

【0028】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求めるステップは、前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づく微分方程式または積分方程式を解くことにより求めることを示すデータが格納されているものである。

【0029】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記未定係数 (α_i) は、該未定係数 (α_i) を用いて求められた前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて求められた前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の前記残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ についてのノルム (2乗和)

10

20

30

40

50

をゼロにする値であることを示すデータが格納されているものである。

【0030】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記未定係数 (α_i) を求めるステップは、変分原理により求めることを示すデータが格納されているものである。

【0031】本発明の記録媒体であって、前記記録媒体に記録された前記プログラムにおいて、前記残差は、前記近似解の行列により表されるものである。

【0032】本発明の記録媒体であって、前記記録媒体に記録された前記プログラムにおいて、前記残差は、前記修正値と影響係数との積に等しいものである。

【0033】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記再修正値を求めるステップは、前記修正値 $\delta x_i^{(i)}$ の $(i=0 \sim m-1)$ の総和を用いることによって求めることを示すデータが格納されているものである。

【0034】本発明の記録媒体において、前記記録媒体に記録された前記プログラムには、前記関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供するステップにおいて、 $m=0$ のときの前記 m 次の近似解として、初期値が提供されるものである。

【0035】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置は、(a) k ($k \geq 1$, k は整数)個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の m (m は0を含む正の整数)次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供する手段と、(b) 前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ についての残差 $(F(x_i^{(m)}))$ を求める手段と、(c) 前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づいて、前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求める手段と、(d) $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ をゼロにするための未定係数 (α_i) を求める手段と、(e) 前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ および前記未定係数 (α_i) に基づいて、再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ を求める手段と、(f) 前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ として収束解を求める手段とを備えたものである。

【0036】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ を前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ として、前記(a)から(f)のそれぞれの手段の動作を繰り返して $(m+2)$ 次の近似解を求める手段(L1)を備えたものである。

【0037】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記(a)から(f)のそれぞれの手段の動作を繰り返して前記 $(m+2)$ 次の近似解を求める手段(L1)の動作を時間 (t) ごとに行わせる手段(L2)を備えたものである。

【0038】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用い

た制御装置において、前記近似解を求める対象としての前記変数は、複数有り、前記複数の変数は、互いに独立した独立変数であり、前記複数の変数のそれぞれごとに、前記(a)から(f)のそれぞれの手段の動作を行わせる手段を備えたものである。

【0039】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記近似解を求める対象としての前記変数は、第1、第2の変数を含み、前記第2の変数は、前記第1の変数に依存する関係とされ、前記第2の変数については前記(a)から(f)のそれぞれの手段の動作を行わせること無く、前記第1の変数について前記(a)から(f)のそれぞれの手段の動作を行わせるものである。

【0040】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記第1の変数として、流体に印加される圧力が入力され、前記第2の変数として、前記流体の速度が入力されるものである。

【0041】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ は、前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ に対する修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ をゼロにする値であるものである。

【0042】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記修正値 $(\delta x_i^{(0)})$ を求める手段は、前記残差 $(F(x_i^{(m)}))$ に基づく微分方程式または積分方程式を解くことにより求めるものである。

【0043】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記未定係数 (α_i) は、該未定係数 (α_i) を用いて求められた前記再修正値 $(\delta x_i^{(m)})$ に基づいて求められた前記 $(m+1)$ 次の近似解 $(x_i^{(m+1)})$ の前記残差 $(F(x_i^{(m+1)}))$ についてのノルム(2乗和)をゼロにする値であるものである。

【0044】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記未定係数 (α_i) を求める手段は、変分原理により求めるものである。

【0045】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記残差は、前記近似解の行列により表されるものである。

【0046】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記残差は、前記修正値と影響係数との積に等しいものである。

【0047】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記再修正値を求める手段は、前記修正値 $\delta x_i^{(i)}$ の $(i=0 \sim m-1)$ の総和を用いることによって求めるものである。

【0048】本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置において、前記関数 $F(x_1, x_2 \dots x_k) = 0$ の前記 m 次の近似解 $(x_i^{(m)})$ を提供する手段

は、 $m=0$ のときの前記 m 次の近似解として、初期値を提供するものである。

【0049】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して、本発明の逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御装置の一実施形態について説明する。

【0050】図1に示すように、本実施形態に係る制御装置10は、制御対象30を制御するための装置であって、データ入力部11と、シミュレーション部12と、前記シミュレーション部12を含む制御部13とを備えている。

【0051】前記データ入力部11には、前記制御対象（圧力；具体的にはアクチュエータやバルブ）30の制御パラメータ（変数）である、圧力 p および速度 u のそれぞれのデータ（関数 $F(p, u)$ ）が入力される。ここで、圧力 p は、流体に印加される圧力であり、速度 u は、流体の速度である。この場合、変数である速度 u は、変数である圧力 p に依存する関係である。

【0052】前記シミュレーション部12は、前記データ入力部11に入力された前記圧力 p および速度 u のそれぞれのデータに基づいて各種演算を行い、前記圧力 p および速度 u の収束解（正解、最適解）を算出する。算出された前記収束解を示すデータは、前記制御部13に入力される。

【0053】前記制御部13は、前記圧力 p および速度 u についての前記収束解を示すデータを入力し、前記収束解を示すデータに基づいて、前記制御対象30を制御する。

【0054】前記シミュレーション部12には、以下に示す各ステップをコンピュータに実行させるためのプログラムが格納されており、前記プログラムに従って前記圧力 p および速度 u の前記収束解が求められる。

【0055】前記シミュレーション部12に格納される前記プログラムは、コンピュータによる流動解析（Computational Fluid Dynamics）を行うためのものである。

【0056】以下、前記プログラムに格納される各ステップについて説明する。本実施形態の特徴を明らかにするために、まず、現状、考えられているステップの流れについて図2を参照して説明する。図2は、現状のステップを示す原フローチャートである。

【0057】図2のステップS1では、まず最初に、前記制御パラメータである前記圧力 p および速度 u のそれぞれについての収束解と思われる初期値（任意の値）が与えられる。これらの初期値は、後述する圧力修正（ステップ2）、速度修正（ステップ3）が行われて当該初期値から近似度が一段上がった近似解となる。その近似解について、収束判定（ステップ4）が行われる。これら変数（制御パラメータ） u と p を求めるのが流動解析の目的であり、これら u と p の収束解が不明なため逐次

近似により求めていく。

【0058】図2のステップS1において、前記圧力 p および速度 u のそれぞれの右肩には、 (m) が記載されている。この (m) は、 m 次近似、すなわち m 回目の近似解を示している。なお、前記初期値では、 $m=0$ である。 $m=0$ では、 u 、 p として任意の解が与えられてから、このフローチャートはスタートする。ここで、 $u^{(m)}$ 、 $p^{(m)}$ が特許請求の範囲に記載した $x_i^{(m)}$ に相当する。

【0059】次に、ステップS2について説明する。ステップS2の内容は、以下の数式1により表現される。

【数1】

$$A_p \delta p = R_p^{(m)}(u^{(m)}, p^{(m)})$$

$$p^{(m+1)} = p^{(m)} + \delta p$$

【0060】ステップS2において、 R_p は、残差を示す。ここで、残差 R_p は、特許請求の範囲に記載した $F(x_i^{(m)})$ に相当する。残差とは、近似解と収束解のそれぞれの F 値の差、すなわち、近似解 $x_i^{(m)}$ を用いた $F(x_i^{(m)})$ の値と、収束解 x_i を用いた $F(x_i)$ の値との差である。ここで、 $F(x_i) = 0$ である。よって、残差は、 $F(x_i^{(m)})$ の値に等しい。残差 R_p の要素である u 、 $p(x_i)$ が収束解のとき、残差 $R_p(F(x_i))$ はゼロになる。言い換えれば、 u 、 p が収束解ではないとき、残差 R_p は何らかの値をもつ。

【0061】ステップS2において、 A_p は影響係数（行列）である。 δp は、圧力 p の修正項（行列）である（ステップ2の第2式参照）。圧力の修正項（圧力修正値） δp は、 $p^{(m)}$ というある仮定された圧力に対する修正項、すなわち、これだけ修正すれば収束解になるはずであるという値に相当する。ここで、圧力修正値 δp は、特許請求の範囲に記載した δx_i に相当する。

【0062】残差 R_p は、影響係数 A_p と圧力修正値 δp の積により表される（ステップ2の第1式参照）。ここで、残差 R_p を表す式は、微分方程式、積分方程式のいずれであってもよい。この圧力修正値 δp についての連立方程式を解いて、圧力修正値 δp を算出する。ここで、残差 R_p に基づいて圧力修正値 δp を算出する方法として、日本機械学会論文集（B編）62巻604号

（1996-12）、論文No. 96-0544に、

「だ円形境界値問題の数値解法—残差切除法について」

と題する田村、菊池、高橋が開示した解法アルゴリズムを用いることができる。残差 R_p に基づいて圧力修正値 δp を算出する場合、図3で述べるステップS1からステップS6のそれぞれのステップを、各変数を適宜置き換えて行うことにより圧力修正値 δp を算出することができる。それらの変数の置換は、当業者にとって容易であるため、ここでは言及しない。そして、算出された圧

力修正値 δp を m 回目の近似解である圧力 $p^{(m)}$ に加算することにより、 $(m+1)$ 回目の近似解である $p^{(m+1)}$ に修正する。

【0063】次に、ステップS3について説明する。ステップS3の内容は、下記の数式2により表現される。

【数2】

$$u^{(m+1)} = u^{(m)} + \frac{\partial u}{\partial p} \delta p$$

【0064】ここでは、ステップS2で修正された圧力 $p^{(m+1)}$ をベースにして速度 $u^{(m)}$ を修正し、 $u^{(m+1)}$ を得る。ここでは、速度 u は、圧力 p に従属する従属変数であり、ステップS2で圧力 $p^{(m+1)}$ が求まれば、自ずと速度 $u^{(m+1)}$ は決まるため、速度 $u^{(m)}$ についてはステップS2を行う必要がない。

【0065】これにより近似解の近似度が一つ上がって、 $u^{(m+1)}$ 、 $p^{(m+1)}$ の値が得られる。なお、このステップS3では、圧力 p をベースに速度 u を求められる例としたが、両値 u 、 p にそのような従属関係が無く、両者が互いに独立した独立変数である場合には、ステップS2によりそれぞれ別々に算出する。

【0066】これらのステップS2、ステップS3を繰り返すことにより収束解に近づいていく。 u 、 p がいずれも、収束解になったときに、残差 $R_p = 0$ になる。これにより、圧力修正値 $\delta p = 0$ になる。圧力修正値 $\delta p = 0$ になったときに、ステップS2の第2式において、 $p^{(m+1)} = p^{(m)}$ となる。また、ステップS3において、 $u^{(m+1)} = u^{(m)}$ となる。

【0067】以上の原フローチャートでは、あくまでも収束解に近づくということが期待されているに過ぎない。なお、ステップS2において、影響係数 A_p をどのような値にするかで収束性に影響が生じるが、ここでは言及しない。

【0068】本発明では、影響係数 A_p よりもむしろ、圧力修正値 δp に着目したものである。すなわち、図2のステップS2で圧力修正値 δp を求めて（第1式）、その求めた圧力修正値 δp をもとに $p^{(m+1)}$ を求める（第2式）ときに、圧力修正値 δp として与える値を、いかにふさわしい値にするかという点に着目したものである。

【0069】従来の原フローチャートによる方法とは別の観点から、圧力修正値 δp の値を求め、これにより収束性を高めるとするのが本発明の考え方である。

【0070】圧力修正値 δp としてどのような値がよいのかを示すのが図3のフローチャートである。

【0071】図3のステップS1は、図2に示した原フローチャートと同じであるため、説明を省略する。

【0072】次に、図3のステップS2の内容は、下記の数式3で表現される。

【数3】

$$A_p \delta p^{(0)} = R_p^{(m)}(u^{(m)}, p^{(m)})$$

【0073】ステップS2では、図2のステップS2と同様に、圧力修正値 $\delta p^{(0)}$ を計算により求める。なお、図3のステップS2の $\delta p^{(0)}$ と異なり、図2のステップS2の δp の右肩には (0) が入っていないが、ここで、 $\delta p^{(0)}$ の求め方は、図2のステップS2と同様である。また、圧力修正値 $\delta p^{(0)}$ は、特許請求の範囲の $\delta x_i^{(0)}$ に相当する。

【0074】次に、ステップS3では、未定係数 α_i を求める。未定係数 α_i を用いるのが本発明の特徴の一つである。未定係数 α_i の求め方については、後述する。

【0075】次いで、ステップS4について説明する。ステップS4の内容は、下記の数式4で表現される。

【数4】

$$\delta p^{(m)} = \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i \delta p^{(i)}$$

$$p^{(m+1)} = p^{(m)} + \delta p^{(m)}$$

【0076】前記ステップS2では、微分方程式（または積分方程式）を解くことにより圧力修正値 $\delta p^{(0)}$ を得た。その圧力修正値 $\delta p^{(0)}$ に対して、ステップS4では、ステップS3で求めた未定係数 α_i を用いて再度修正を加えて、圧力再修正値 $\delta p^{(m)}$ を得ることとしている。

【0077】すなわち、ステップS4の第1式の右辺は、 $\alpha_i * \delta p^{(i)}$ において、 $i=0$ から $m-1$ までの総和の意味である。上記右辺により得られた値を、圧力再修正値 $\delta p^{(m)}$ とする。ステップS4の第2式において、この圧力再修正値 $\delta p^{(m)}$ を $p^{(m)}$ に加算して、その加算結果を修正された圧力 $p^{(m+1)}$ とする。

【0078】次のステップS5の内容は、下記の数式5で表現される。

【数5】

$$u^{(m+1)} = u^{(m)} + \frac{\partial u}{\partial p} \delta p^{(m)}$$

【0079】ステップS5については、図2のステップS4と同様であるため、その説明を省略する。

【0080】図3のステップS4に示した圧力再修正のステップの意義は、以下の通りである。

【0081】図2に示した原フローチャートのステップS2において、得られた圧力修正値 δp を、次の反復 $(m+1)$ ステップで、残差 $R_p^{(m+1)} = 0$ となるように修正することができれば、 $(m+1)$ ステップでは、圧力修正値 $\delta p = 0$ となり、反復は完了（収束）する（ $p^{(m+1)} = p^{(m)}$ 、 $u^{(m+1)} = u^{(m)}$ ）。

【0082】言い換えれば、次の通りである。図2のステップS2では、まず、残差 $R_p^{(m)}$ を求め、その残差 $R_p^{(m)}$ をもとに、圧力修正値 δp を計算する。その計算で求められた圧力修正値 δp を近似値 $p^{(m)}$ に加算して、新しい近似値 $p^{(m+1)}$ を求めている。

【0083】図2の原フローチャートによれば、収束判定の後、その新しい近似値 $p^{(m+1)}$ を元のステップに戻したときに、残差 R_p がゼロになるかどうかは保証されていない。それを保証して残差 $R_p = 0$ にすることができれば、圧力修正値 $\delta p = 0$ になるから、収束解になる（ $p^{(m+1)} = p^{(m)}$ 、 $u^{(m+1)} = u^{(m)}$ ）。

【0084】このとき、残差 R_p をもとに計算により求めた圧力修正値 δp を、そのまま近似値 $p^{(m)}$ に加算するのではなく、次に再度そのステップに戻ってきたときに、残差 $R_p^{(m+1)}$ がゼロになるように圧力修正値 δp を修正しておけばよい（この修正された圧力修正値が前記圧力再修正値 $\delta p^{(i)}$ である）。そうすれば、理論的には、1回のサイクルで解を収束させることができる。

20

$$R_p^{(m+1)} = R_p^{(m)} + \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i \cdot \delta R_p^{(i)}$$

【0089】上記式7（ $R_p^{(m+1)}$ を求める式）であるから、下記式8を満たす未定係数 α_i を求めればよい。

【数8】

$$\|R_p^{(m+1)}\| = 0$$

【0090】上記式8の左辺、すなわち、 $R_p^{(m+1)}$ のノルム（2乗和）が0であるということは、残差 $R_p^{(m+1)}$ の行列の全ての要素が0である

$$\sum_{j=0}^{m-1} (\delta R_p^{(i)} \cdot \delta R_p^{(j)}) \cdot \alpha_j = -(\delta R_p^{(i)} \cdot R_p^{(m)}) \quad , (i = 0 \sim m-1)$$

【0092】上記式9において、 α_j を求め、この α_j を上記式7（ $R_p^{(m+1)}$ を求める式）の右辺第2項に代入すれば、前述した圧力再修正値 $\delta p^{(i)}$ が求められる。

【0093】上記のようにして求めた圧力再修正値 $\delta p^{(i)}$ を、図3の新フローチャートのステップS4の第2式においてm次の近似解である $p^{(m)}$ に加算すれば、 $(m+1)$ 次の近似解である $p^{(m+1)}$ が求められる。

【0094】図3のステップS5において、この $p^{(m+1)}$ をもとに $u^{(m+1)}$ を求めた後に、フローチャートをもとに戻って、これら $p^{(m+1)}$ 、 $u^{(m+1)}$ についての残差 $R_p^{(m+1)}$ を求めれば、

【数10】

【0085】すなわち、図2の原フローチャートに追加された、図3のステップS4に示した圧力再修正の項（ステップ）は、上記した「 $(m+1)$ ステップでの収束」を実現するためのものである。その理由について、次に説明する。

【0086】要は、図3のステップS4で用いる前記未定係数 α_i をどのように決めて、圧力修正値 δp をどのように修正するかである。前記未定係数 α_i の求め方は、以下の通りである。

【0087】まず、これまで得られた $\delta p^{(i)}$ 、 $(i = 0 \sim m-1)$ をもとに、圧力再修正値 $\delta p^{(i)}$ について、下記式6とおく。

【数6】

$$\delta p^{(m)} = \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i \delta p^{(i)} \quad (q: \text{未定係数})$$

【0088】そして、 $(m+1)$ 次解の残差である $R_p^{(m+1)}$ を仮に計算してみる（下記式7参照）。

【数7】

$$\delta R_p^{(i)} = \frac{dR_p}{dp} \cdot \delta p^{(i)}$$

ということである。

【0091】未定定数 α_i の個数（m個）は $R_p^{(m+1)}$ の成分の個数より遥かに少ない為、式（8）を厳密に満たす α_i は得られない。しかし $\|R_p^{(m)}\|$ より確実に小さな $\|R_p^{(m+1)}\|$ となる α_i をつくる事が出来れば確実に収束が保証される。この未定係数 α_i は、変分原理に基づいて下記式を解くことにより得られる。

30

【数9】

$$\|R_p^{(m+1)}\| = \|R_p^{(m)}\| - \left\| \sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i \delta R_p^{(i)} \right\| < \|R_p^{(m)}\|$$

40

より、 $p^{(m+1)}$ 、 $u^{(m+1)}$ はより収束解に近い近似解となる。

【0095】次に、図4および図5を参照して、本実施形態の効果について説明する。

【0096】図4のグラフは、図2および図3のそれぞれのフローチャートによる流れ計算の反復回数と残差（ここでは圧力残差 $R_p^{(m)}$ ）との関係を示したものである。

【0097】図4のグラフでは、縦軸が $\log(\epsilon)$ 、 $\epsilon = R_p^{(m)}$ とされ、横軸が反復回数（m回）とされ

50

ている。

【0098】ここでは、 $\log(\varepsilon)$ の値として「-5」が基準(収束解)値(10^{-5})とされている。図2に示した原ループでは、-5の値に到達するまでに、反復回数(m)は90~100回必要であったのに対し、図3に示した新ループでは、30回で済む、という結果が得られた。

【0099】また、図4に示すように、原ループでは圧力残差 $R_p^{(m)}$ が 10^{-5} より下にはならないが、新ループによれば同じ反復回数(100回)で 10^{-11} まで小さくすることができる。

【0100】図5は、本実施形態の流れ計算がどれだけの計算時間で行われたかを示す図である。新ループでは、前記未定係数 α_i という値を求める必要があるが、仮にそのための計算負荷が大きければ、意味が無い(十分に高速という効果を得ることができない)。

【0101】図5のグラフにおいて、縦軸は、CPUが使った計算時間(sec)である。横軸は、「ステップ数」を示しており、その意味は次の通りである。流体解析の場合、時々刻々と流体の流れが変わるため、図2および図3のフローチャートに示した「収束判定」のループL1の外側に、「時間」に関するループL2(ステップS7)が加わる。この時間のループL2を1ステップとしてカウントしたときのステップ数である。

【0102】図5のグラフにおいて、(1)は原ループを示し、(2)は新ループを示している。60回のステップを行うのに、原ループ(1)では5000secかかり、新ループ(2)では1500secで済むという結果が得られた。

【0103】上記に説明した本実施形態は、流れ計算の例であるが、他にも例えば最適化手法にも用いることができる。最適化手法においても、前記流れ計算と同様に、反復繰り返されるループ計算が行われるため、本実施形態の近似解法アルゴリズムを適用すれば、高速で最適解を得ることができる。

【0104】以上説明した本実施形態が、従来の近似解法アルゴリズムと異なる点は以下の通りである。

【0105】すなわち、従来の近似式では、収束解に近づくに連れて残差 R_p が小さくなるため、その結果として、収束解に近づく速度が遅くなってしま(図4のグラフにおける原ループの曲線参照)。図2のステップS2においては、前述したように、圧力修正値 δp は、残差 R_p に基づいて求められる。この場合、小さな値の残差 R_p に基づいて圧力修正値 δp を求めると、その圧力修正値 δp の値も小さくなり、その結果、収束解に近づく速度が遅くなるためである。

【0106】これに対し、本実施形態では、上記のような未定係数 α_i を用いて圧力再修正値 $\delta p^{(m)}$ を求め、これにより、(m+1)次の近似解 $p^{(m+1)}$ を得るようにしている。したがって、従来と異なり、m次

解の残差 $R_p^{(m)}$ の値のみに関することなく、(m+1)次のステップでは”収束解と思われる値”までいわずにジャンプできることになり、上記収束解に近づくに連れて収束解に近づく速度が遅くなるという欠点がない。

【0107】本実施形態では解の対象(変数、制御パラメータ)を、速度u、圧力pとしたが、これらに限られることなく、航路、重量、燃料消費量、温度等であってもよいことは勿論である。

【0108】また、本実施形態では、解の対象を速度u、圧力pの二つとしたが、一つであってもよいし、三つ以上であってもよい。

【0109】また、本実施形態においては、速度uの近似解を求めるに際して、圧力pの近似解を求めた後に、その圧力pの近似解に基づいて求めることとした。しかしながら、両変数p、uが互いに独立した独立変数である場合には、圧力pの近似解に基づいて求める代わりに、速度uの近似解を残差および未定係数 α_i を用いた再修正値から直接単独で求めてもよい。

【0110】

【発明の効果】本発明による逐次近似解法アルゴリズムを用いた制御方法によれば、(a) k ($k \geq 1$, kは整数)個の変数からなる関数 $F(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ のm (mは0を含む正の整数)次の近似解

($x_i^{(m)}$)を提供するステップと、(b)前記m次の近似解($x_i^{(m)}$)についての残差($F(x_i^{(m)})$)を求めるステップと、(c)前記残差($F(x_i^{(m)})$)に基づいて、前記m次の近似解($x_i^{(m)}$)に対する修正値($\delta x_i^{(0)}$)を求めるステップと、(d) (m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)の残差($F(x_i^{(m+1)})$)をゼロにするための未定係数(α_i)を求めるステップと、(e)前記修正値($\delta x_i^{(0)}$)および前記未定係数(α_i)に基づいて、再修正値($\delta x_i^{(m)}$)を求めるステップと、(f)前記再修正値($\delta x_i^{(m)}$)に基づいて、前記(m+1)次の近似解($x_i^{(m+1)}$)として収束解を求めるステップとを備えているため、収束性が高く、したがって反復回数が少なく計算時間が少なくて済むと共に高精度解析を行い易い。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、本発明による近似解法アルゴリズムを用いた制御方法の一実施形態を構成するブロック図である。

【図2】図2は、従来の近似解法アルゴリズムを用いた制御方法を示すフローチャート図である。

【図3】図3は、本実施形態の近似解法アルゴリズムを用いた制御方法を示すフローチャート図である。

【図4】図4は、図2および図3のそれぞれによる計算の反復回数と圧力残差との関係を示すグラフ図である。

【図5】図5は、図2および図3のそれぞれによる計算

のステップ数とCPUの計算時間との関係を示すグラフ図である。

【符号の説明】

10…制御装置

11…データ入力部

12…シミュレーション部

13…制御部

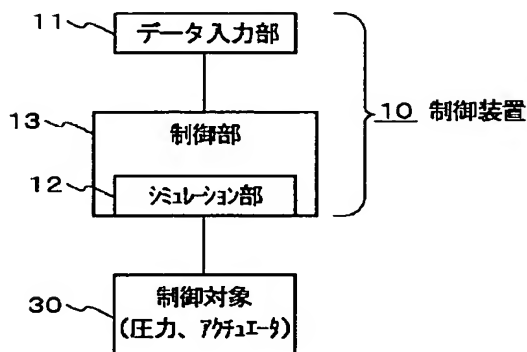
30…制御対象（アクチュエータ）

(1)…原ループ

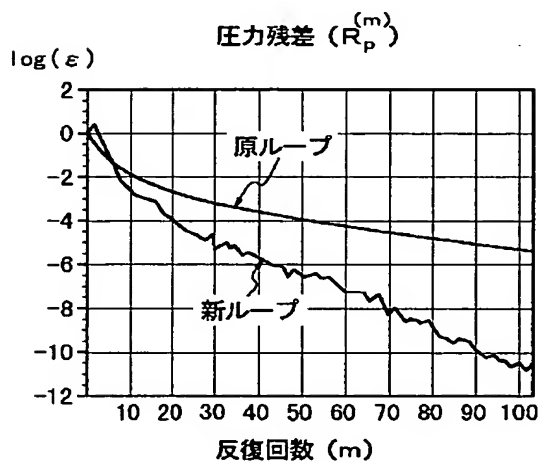
(2)…新ループ

A_p …影響係数

【図1】



【図4】



$R_p^{(m)}$ … m 次のステップでの残差

$R_p^{(m+1)}$ … $(m+1)$ 次のステップでの残差

$p^{(m)}$ … m 次の圧力の近似解

$u^{(m)}$ … m 次の速度の近似解

$p^{(m+1)}$ … $(m+1)$ 次の圧力の近似解

$u^{(m+1)}$ … $(m+1)$ 次の速度の近似解

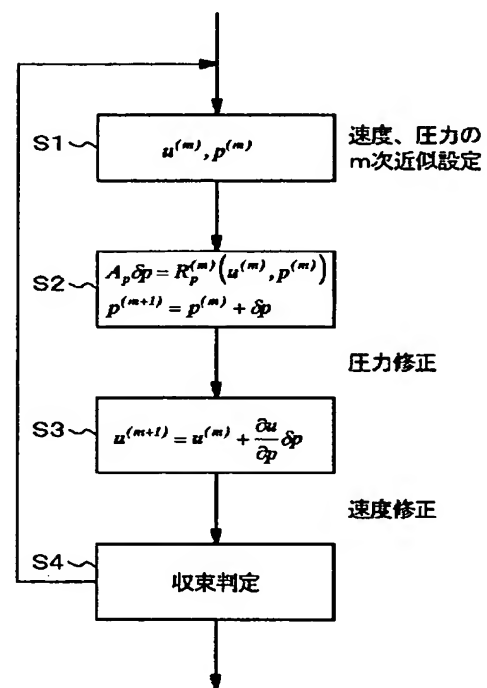
δp …圧力修正値

$\delta p^{(0)}$ …圧力修正値

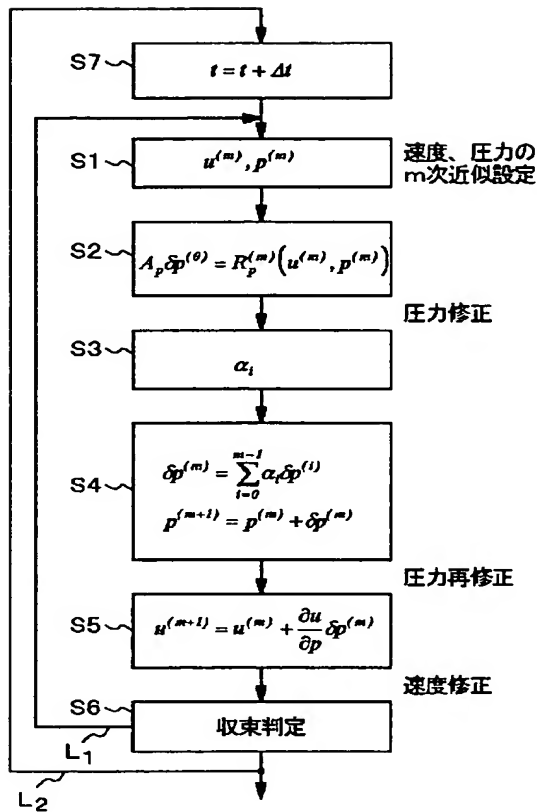
$\delta p^{(m)}$ …圧力再修正値

10 α_i …未定係数

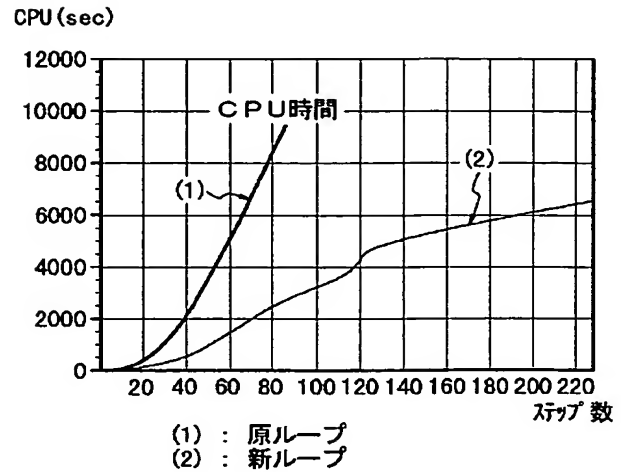
【図2】



【図3】



【図5】



フロントページの続き

(72)発明者 高橋 匡康
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
科学技術庁航空宇宙技術研究所内

(72)発明者 田村 敦宏
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
科学技術庁航空宇宙技術研究所内

(72)発明者 足立 武司
長崎県長崎市深堀町五丁目717番1号 三
菱重工業株式会社長崎研究所内

Fターム(参考) 5B056 AA06 BB03 BB51 HH07
5H004 GB01 HA03 HB02 HB03 HB08
KC02 KC12